Comité Nacional Venezolano

III CONGRESO VENEZOLANO DE REDES Y ENERGÍA ELÉCTRICA

Marzo 2012

B5-71

ESTUDIO SOBRE LA POSIBLE APLICACIÓN DE UN RELÉ NUMÉRICO PARA EL ESQUEMA DE SEPARACIÓN DE ÁREAS DEL CENTRO DE TRANSMISIÓN CAPITAL DE CORPOELEC

L. Monterrey[*,**,***] **Y. Blanco**[*] **E. Sorrentino**[**]

[*]**Corpoelec - Centro de Transmisión Capital (CTC)**

[**]**Universidad Simón Bolívar**

[***]**LATT Ingeniería C.A.**

RESUMEN

En este artículo se describe el estudio realizado para la posible aplicación del relé numérico SEL 451-4 con el fin de obtener las funciones de protección requeridas para el Esquema de Separación de Áreas (ESA) del Centro de Transmisión Capital (CTC). El objetivo fue emular el ESA pre-existente en el CTC mediante las funciones disponibles en el relé numérico. Esto implica la programación del esquema mediante las funciones lógicas disponibles en el relé numérico y el uso de varias funciones de protección (baja y sobre frecuencia, potencia inversa y bajo voltaje). El ESA pre-existente en el CTC está conformado por relés individuales, en algunos casos electromecánicos, y no fue posible garantizar la emulación idéntica del relé de baja tensión y del elemento de bloqueo de las funciones de frecuencia ante baja tensión. Debido a esto, se programó una función distinta, siguiendo las recomendaciones del fabricante del relé numérico. El esquema programado en el relé numérico fue sometido a un conjunto de pruebas para su validación. Por un lado, se probó individualmente a los elementos del esquema. Por otro lado, se inyectó un conjunto de formas de ondas de voltaje y corriente, registradas en los puntos de ubicación del ESA del CTC, durante eventos de gran importancia para el CTC. El comportamiento del esquema programado se consideró adecuado y no se detectó operación incorrecta en ningún caso.

PALABRAS-CLAVE

Esquema de Separación de Áreas.

Luis Monterrey: luis_monterrey@msn.com, teléfono: 58-416-4292780

1. INTRODUCCIÓN

El Esquema de Separación de Áreas (ESA) es un esquema de protección ante eventos mayores de inestabilidad, tales como la pérdida de generación o fallas en la red troncal de transmisión, en donde para evitar el colapso de todo el sistema de potencia, éste se divide en áreas [1-3]. La respuesta del sistema de potencia ante contingencias severas se refleja en la frecuencia y/o voltaje del sistema. Por esto, el ESA del Centro de Transmisión Capital (CTC) de CORPOELEC emplea protecciones de frecuencia y de voltaje para determinar la condición de separación en área. Sin embargo, para garantizar que la generación interna del CTC sea suficiente para suplir la demanda interna una vez separada del resto del Sistema Interconectado Nacional (SIN), el ESA posee un permisivo de potencia inversa para la función de baja tensión y baja frecuencia. Este esquema se emplea para preservar la mayor cantidad de carga y una vez solucionada la contingencia se procede a restablecer el sistema de potencia.

En este artículo se presenta el estudio realizado sobre la aplicación del relé numérico SEL 451-4 para el ESA del CTC mediante las funciones disponibles en dicho relé. Esto implicó la programación de funciones lógicas de SELogic en el SEL 451-4 y el uso de varias funciones de protección, con el fin de buscar la emulación del ESA pre-existente en el CTC. Por otro lado, se sometió a un conjunto de pruebas el esquema programado en el relé numérico para la validación de cada uno de los elementos de protección que integra el esquema. Dichas pruebas consistieron en la inyección de formas de ondas creadas por el equipo de prueba y de las ondas adquiridas durante eventos previos de gran importancia para el CTC.

2. DESCRIPCION DEL ESQUEMA DE SEPARACIÓN DE ÁREAS DEL CTC DE CORPOELEC

El sistema de potencia del CTC de CORPOELEC posee cuatro puntos de interconexión con el SIN, dos de ellos a través de autotransformadores 765 kV /230 kV y los otros dos por medio de líneas de transmisión en 230 kV [4]. En cada uno de los puntos de interconexión del CTC con el resto del SIN se dispone de un circuito de disparo con dos esquemas de operación para la separación del CTC del resto del sistema:

2.1. Esquema 1

Este esquema posee un circuito de disparo donde se tiene los contactos de un relé de potencia inversa (32) como permisivo que está en serie con el paralelo de los contactos del relé de bajo voltaje trifásico (27) y del relé de baja frecuencia (81). Para que exista disparo tiene que operar simultáneamente el relé de baja tensión trifásica ajustado en 0,75 p.u. y el relé de potencia inversa, o este último con el relé de baja frecuencia ajustado en 58,2 Hz [5]. El relé de frecuencia posee un retardo intencional de tiempo de 150 ms, por lo que debe mantenerse la condición de baja frecuencia por este tiempo para que el relé de frecuencia opere.

2.2. Esquema 2

El esquema 2 está conformado por un relé de frecuencia con función de rata de cambio de frecuencia (df/dt). Para que el mismo opere se debe presentar una rata de cambio de frecuencia negativa igual o menor a -1,2 Hz/s y una frecuencia inferior a 59,5 Hz, ambas condiciones deben mantenerse simultáneamente por 150 ms para cumplir con el retardo de intencional de tiempo [5]. Además, este esquema posee un bloqueo por 60 segundos si se presentase primero una rata de cambio de frecuencia positiva igual o mayor a 0,5 Hz/s y una sobre frecuencia mayor de 60,5 Hz simultáneamente por 150 ms [4]. Este esquema se logra mediante la conexión entre los contactos de salida del relé de protección y los contactos de salida de relés auxiliares. En la figura 1 se muestran los diagramas de conexión de los contactos de salidas de los relés de ambos esquemas:

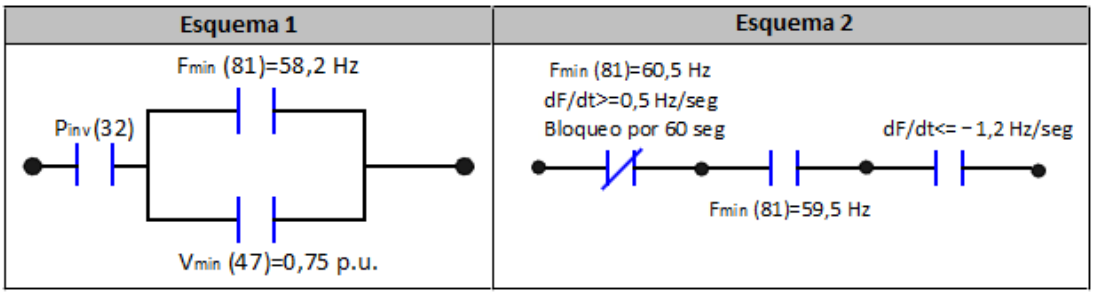

Fig.1: Diagrama de conexión de los contactos de salida de los relés del Esquema de Separación de Áreas del CTC.

Los relés de frecuencia que integran el ESA poseen un elemento de bloqueo de las funciones de frecuencia ante baja tensión, dicho bloqueo previene la operación errónea de las funciones de frecuencia ante fallas en las líneas [2].

3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL RELÉ NUMÉRICO SEL 451-4

El SEL 451-4 es un relé numérico de control, automatización y protección de una bahía de una subestación, fabricado por Schweitzer Engineering Laboratories (SEL). Entre los elementos de protección del relé se encuentran las funciones de baja y sobre frecuencia, rata de cambio de frecuencia, potencia inversa y baja tensión trifásica. Además, el SEL 451-4 permite implementar esquemas complejos de protección mediante funciones lógicas de SELogic que emplean variables de las funciones de protección, lógicas booleanas, retardos de tiempo, entre otros [6]. Por ende, el ESA de la CTC puede ser emulado en el relé SEL 451-4 mediante la programación de funciones lógicas en SELogic.

4. DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS REALIZADAS

Se diseño un conjunto de pruebas para evaluar las funciones de frecuencia, baja tensión y potencia inversa del esquema programado en el relé numérico SEL 451-4. Dichas pruebas se describen de forma general a continuación:

4.1 Pruebas de estado estático

Las pruebas estáticas consisten en la inyección de ondas de voltaje y corriente con magnitud y frecuencia constante en el tiempo. Mediante estas pruebas se verificó la exactitud de las funciones de protección de los relés para unos determinados ajustes.

4.2 Pruebas de estado dinámico

Las pruebas dinámicas permiten analizar el comportamiento y tiempo de operación de los relés mediante la inyección de ondas de voltaje y corriente que cambian su magnitud, fase o frecuencia en el tiempo, según lo requiera la prueba.

4.3 Pruebas de estado transitorias

Las pruebas transitorias consisten en la reproducción de un evento eléctrico (archivos COMTRADE) registrado por algún grabador de fallas digital (equipos Indactic). Estas pruebas permiten observar el comportamiento de los relés ante condiciones aproximadas de falla real. Se utilizaron archivos COMTRADE de los eventos de gran importancia para el CTC obtenidos durante el año 2008 y 2009 por los equipos Indactic.

5. ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS

Todas las funciones de protección del esquema programado en el SEL 451-4 se sometieron a un conjunto de pruebas de estado estático, dinámico y transitorio para su validación. A continuación se muestra el análisis del conjunto de pruebas realizadas a cada elemento del ESA emulado en el SEL 451-4:

5.1 Función de baja tensión trifásica

El relé de baja tensión ICR53A, instalado actualmente en el ESA del CTC, posee un tiempo de operación que depende de una curva voltaje vs tiempo [7]. Por otro lado, opera ante baja tensión en una o dos de las fases teniendo mayor sensibilidad en la fase B. Este comportamiento descrito no pudo ser emulado mediante la programación de funciones lógicas en el relé numérico SEL 451-4. Debido a esto, se evaluó una función distinta programada siguiendo las recomendaciones del fabricante del relé para un esquema de protección por baja tensión [8]. Dicha función actúa solo en caso de presentarse baja tensión en las tres fases simultáneamente por un periodo de tiempo establecido. Esto previene la operación errónea ante fallas monofásicas y bifásicas, al operar únicamente ante baja tensión en las tres fases.

La función de baja tensión programada en el SEL 451-4 se evaluó mediante pruebas dinámicas y transitorias, en donde el relé numérico operó correctamente durante las pruebas. Igualmente, se determinó que el tiempo de operación de esta función es de 80 ms aproximadamente, no obstante, se agregó un retardo de tiempo de 9 ciclos para evitar la operación errónea de esta función ante fallas trifásicas.

5.2 Función de potencia inversa

Para el análisis de esta función no se disponía del relé de potencia inversa CPP13E empleado en el ESA del CTC, por lo que dicha función se caracterizó mediante el funcionamiento descrito en el manual del relé [9]. El CPP13E es de alta precisión y actualmente esta ajustado para operar ante flujos de potencia inversa superiores a 296 kW. No obstante, por limitaciones de precisión del SEL 451-4 se recomendó cambiar el umbral a 1MW, el cual solo representa el 0,25% de la capacidad de las líneas de 230 kV. Igualmente, todos los eventos de inestabilidad de frecuencia y voltaje estudiados presentan flujos de potencia inversa superiores al ajuste recomendado. La función de potencia inversa programada en el relé SEL 451-4 depende de la activación de una variable de medición de potencia activa por la línea.

Con las pruebas estáticas se verificó la precisión del relé numérico para el ajuste propuesto, cumpliendo con la precisión establecida en el manual del relé [10]. Mientras con las pruebas dinámicas y transitorias se determinó el tiempo de operación de la función de potencia inversa, el cual se encuentra entre 100 y 200 ms dependiendo del evento.

5.3 Función de frecuencia

5.3.1 Función de baja frecuencia

Para el análisis de la función de baja frecuencia del relé SEL 451-4 se realizaron pruebas estáticas, dinámicas y transitorias, con las cuales se estudió el comportamiento de esta función ante diversos eventos de inestabilidad. Igualmente, se realizaron estas pruebas a los relés que integran actualmente el ESA del CTC para realizar comparaciones en su funcionamiento y tiempo de operación. Mediante las pruebas estáticas se determinó que el relé SEL 451-4 cumple con la precisión establecida por el fabricante de ±10 mHz [10]. Por otro lado, no se detectó una operación incorrecta de la función de baja frecuencia durante el conjunto de pruebas realizadas.

El tiempo de operación de la función de baja frecuencia en los relés de frecuencia se determinó mediante pruebas dinámicas con diferentes rampas de frecuencia y a través de pruebas transitorias con diferentes registros. En la tabla I se muestra el tiempo promedio de operación de los tres relés de frecuencias estudiados. El tiempo de operación de los tres relés aumento durante las pruebas transitorias, no obstante, se mantuvo la diferencia de tiempo entre los relés. Por ende, en base a los tiempos obtenidos se recomendó un retardo de tiempo de 4 ciclos para la función de baja frecuencia en el SEL 451-4, por lo que se tendrá un tiempo promedio de disparo de 200 ms (similar al tiempo de disparo de los relés que integran actualmente el ESA del CTC).

Tabla.I: Tiempo promedio de operación de la función de baja frecuencia de los relés de frecuencias.

Tiempo de Operación promedio (ms)			
Tipo de prueba	**SEL 451-4**	**SPAF 140C**	**FCN 950**
	Instantáneo	**Retardo 150 ms***	**Instantáneo**
Dinámicas	66,1	151,1	136,5
Transitorias	132,1	217,9	194,1

*El menor retardo de tiempo ajustable en el SPAF 140C es 150 ms, por lo que se considera como su tiempo mínimo de operación [11].

5.3.2 Función de rata de cambio de frecuencia

La función de rata de cambio de frecuencia se analizó mediante un conjunto de pruebas dinámicas y transitorias en donde se verificó la precisión de los relés y se determinó sus tiempos de operación. Durante las pruebas no se detectó una actuación errónea de dicha función. Por otro lado, esta función depende de la activación de dos variables (rata de cambio de frecuencia y permisivo de frecuencia), debido a esto el tiempo de operación depende significativamente de la variable que actué en segunda instancia. Por esta razón, se analizó el tiempo de operación de cada variable por separado:

1. Cuando el disparo depende de la activación del permisivo de frecuencia: el tiempo de operación en esta condición se determinó mediante pruebas dinámicas y transitorias. Dicho tiempo de operación es similar al presentado durante las pruebas de la función de baja frecuencia al depender solo de la variable de baja o sobre frecuencia para dar la orden de disparo.
2. Cuando el disparo depende de la activación de variable de rata de cambio de frecuencia: este tiempo para los tres relés estudiados depende significativamente de la pendiente con la cual cae la frecuencia del sistema. Sin embargo, los registros de eventos donde se presentaba dicha dependencia se debía a que el registro oscilográfico estaba mal grabado (comenzaba una vez iniciado el evento), reposición de una variable interna del relé o precisión del mismo. Debido a esto, no se toma en consideración los tiempos obtenidos en este punto para establecer el ajuste del retardo de tiempo de esta función.

Tabla.II: Tiempo promedio de operación de la función de rata de cambio de frecuencia de los relés de frecuencias.

Tiempo de Operación promedio (ms)				
Variable dependiente	**Tipo de prueba**	**SEL 451-4**	**SPAF 140C**	**FCN 950**
		Instantáneo	**Retardo 150 ms***	**Instantáneo**
Permisivo de frecuencia	**Dinámicas**	66,4	161,2	141,7
	Transitorias	92,9	182,3	161,7
Rata de cambio de frecuencia	**Dinámicas**	176.9	151.2	125.2
	Transitorias	207,1	238,6	192,8

*El menor retardo de tiempo ajustable en el SPAF 140C es 150 ms, por lo que se considera como su tiempo mínimo de operación [11].

Se propone un retardo de tiempo basado principalmente en el tiempo de operación por activación del permisivo de frecuencia. Por ende, en base a los tiempos obtenidos se recomendó un retardo de 5 ciclos para esta función en el relé numérico, por lo que se tendría un tiempo promedio de disparo similar al de los otros dos relés de frecuencia estudiados (180 ms aproximadamente). Igualmente, este ajuste permite que la función de baja frecuencia y la función de rata de cambio de frecuencia del SEL 451-4 posean un tiempo similar de operación.

5.3.3 Elemento de bloqueo de las funciones de frecuencia por baja tensión

Los tres relés de frecuencia que integran actualmente el ESA del CTC poseen un bloqueo ante baja tensión para evitar disparos erráticos durante fallas en las líneas. Sin embargo, los tres relés instalados en el ESA poseen diferentes umbrales para este ajuste (entre 0.45 y 0.6 en p.u.).

Se buscó la emulación del elemento de bloqueo y desbloqueo de las funciones de frecuencia del relé SPAF 140C mediante la programación de funciones lógicas en el SEL 451-4. No obstante, debido a que el relé SEL 451-4 determina la frecuencia del sistema mediante la transformada de Clarke que emplea las tres tensiones del sistema, se programó una función que supervisa las tres tensiones siguiendo las recomendaciones del fabricante del relé [8]. Por ende, para que exista el bloqueo de las funciones de frecuencia se requiere que una o varias de las tensiones del sistema de potencia sean inferiores al ajuste establecido.

Mediante las pruebas dinámicas y transitorias se determinó que para tener un tiempo de bloqueo y desbloqueo similar al relé SPAF 140C se debe tener un retardo de tiempo de 3 ciclos y un tiempo de duración del bloqueo de 3 ciclos para la función programada en el SEL 451-4. Por último, se recomienda un umbral de tensión de bloqueo de 0.6 p.u. debido a que el estudio se realizó con el relé SPAF 140C que posee este ajuste.

6. ESQUEMA EMULADO EN EL RELÉ NUMÉRICO SEL 451-4 PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN EL ESA DE LA CTC

Se utilizaron variables internas del SEL 451-4 para la programación de las funciones lógicas del esquema emulado en el relé. Las variables internas del SEL 451-4 empleadas en el esquema mencionado para su implementación en el ESA del CTC se muestran en la tabla III.

Tabla.III: Variables internas del relé SEL 451-4 usada para la programación del esquema emulado.

Variables	Definición	Rango	Unidades
FREQ	Medición de frecuencia del sistema.	40.10 – 64.99	Hz
DFDT	Rata de cambio de frecuencia.	0.00 – 10.00	Hz/s
3P_F	Potencia activa fundamental trifásica	-	MW primario
VAFIM	Magnitud de voltaje instantáneo filtrado de fase A.	0.00–300.00	V secundario
VBFIM	Magnitud de voltaje instantáneo filtrado de fase B.		
VCFIM	Magnitud de voltaje instantáneo filtrado de fase C.		

6.1 Elemento de bloqueo de las funciones de frecuencia ante baja tensión

Las funciones de frecuencia del esquema emulado en el relé numérico son supervisadas por una función de baja tensión. Si existe una caída de tensión en cualquiera de la fase (Va, Vb o Vc) inferior al umbral establecido (0,6 p.u.), el relé bloqueará el disparo de las funciones de frecuencia.

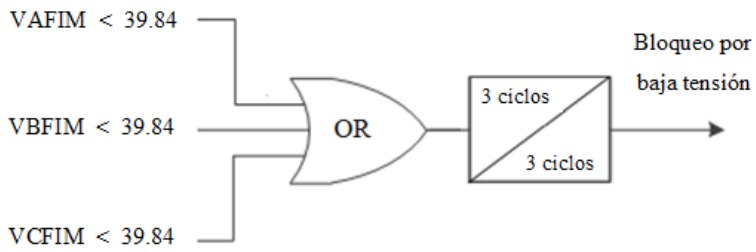

Fig.2: Diagrama lógico de bloqueo de las funciones de frecuencia por baja tensión usado en el relé SEL 451-4.

6.2 Esquema 1

Este esquema está constituido por la función de potencia inversa como permisivo de operación de la función de bajo voltaje trifásico (con retardo de tiempo 9 ciclos) y de la función de baja

frecuencia (con retardo de tiempo de 4 ciclos), como se muestra en el diagrama lógico de la figura 3.

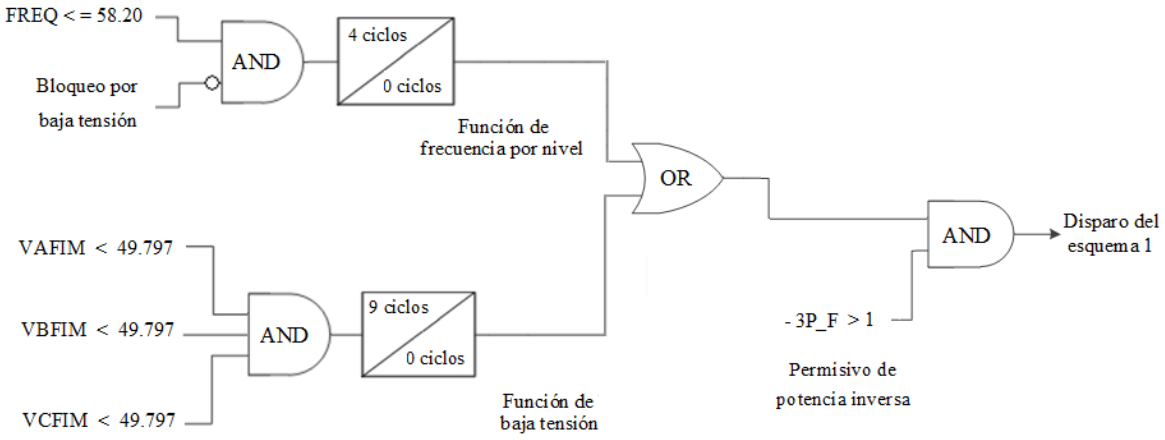

Fig.3: Diagrama lógico del Esquema de disparo 1 del ESA de la CTC.

6.3 Esquema 2

El esquema 2 está conformado por la función de rata de cambio de frecuencia (df/dt), la cual opera cuando se presenta una rata de cambio de frecuencia negativa igual o menor a -1,2 Hz/s y una frecuencia inferior a 59,5 Hz , ambas condiciones deben mantenerse simultáneamente por 5 ciclos para cumplir con el retardo de intencional de tiempo. Además, este esquema posee un bloqueo por 3600 ciclos si se presentase primero una rata de cambio de frecuencia positiva igual o mayor a 0,5 Hz/s y una sobre frecuencia mayor de 60,5 Hz simultáneamente por 5 ciclos, como se muestra diagrama lógico de la figura 4.

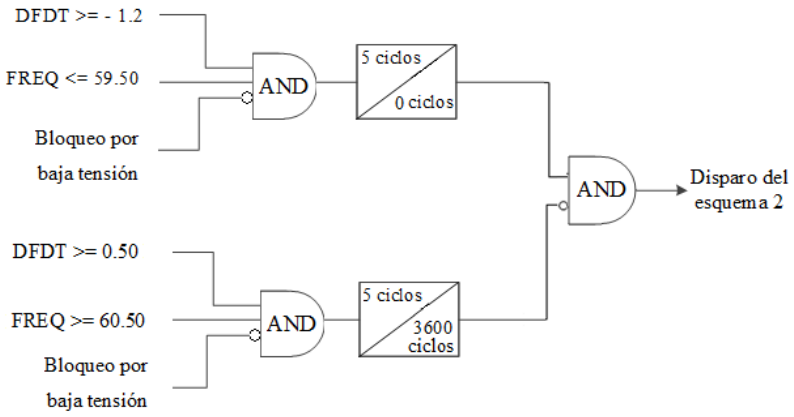

Fig.4: Diagrama lógico del Esquema de disparo 2 del ESA de la CTC.

Ambos esquema puede activar el ESA de CTC y disparar los interruptores asociados a esta protección en las subestaciones.

7. CONCLUSIONES

- El ESA del CTC de CORPOELEC se pudo implementar en el SEL 451-4 mediante las funciones disponibles en dicho relé. Esta implementación fue validada en base al análisis del conjunto de pruebas a la que fue sometido el relé numérico. De la misma forma, el comportamiento del esquema emulado en el SEL 451-4 fue satisfactorio durante las pruebas realizadas y no se detectó operación incorrecta en ningún caso.
- No fue posible garantizar una emulación idéntica en varias funciones de protección pre-existentes en el ESA. Debido a esto, se programó una función distinta para estos casos y se propusieron varios cambios en los ajustes del ESA de la CTC. Entre los ajustes modificados se encuentran los retardos de tiempo de las funciones de frecuencia y de baja tensión. Igualmente, se propuso cambiar el umbral de la función de potencia inversa.
- Se recomienda realizar estudios posteriores para la adaptación de la función de baja tensión trifásica a las condiciones actuales del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), y establecer ajustes adecuados para la mencionada función antes de ser empleada en el ESA de la CTC. Igualmente, se recomienda realizar un estudio del comportamiento dinámico del sistema, con el fin de establecer un adecuado ajuste para el elemento de bloqueo de las funciones de frecuencia en cada subestación donde se implementa el ESA.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Undren, E. A. y Elmore, W. A. "Load-Shedding and Frequency Relaying" (2004, pages 1-3).

[2] IEEE Power Engineering Society, Power System Relaying Committee "Guide for the application of protective relays used for abnormal frequency load shedding and restoration" (Agosto 2007, pages 2-8, 19-21).

[3] Niklas Stråth "Islanding Detection in Power Systems" (Lund University, 2005, pages 29-33).

[4] CORPOELEC "Evaluación de los esquemas de separación de áreas y botes de carga por baja frecuencia del sistema eléctrico nacional. Etapa I (Electricidad de Caracas)" (2009, pages 51-52, 57-59).

[5] EDC "Manual del sistema de protecciones, Capítulo I: Filosofía de protecciones 230kV" (Marzo 2006, pages 20-23).

[6] SEL "SEL-451 Relay Protection, Automation and Control System, Instruction Manual" (Julio 2010, pages R.1.14-R.1.15, R1.58-R1.59, R.3.12-3.18, R.3.26 - R.3.30).

[7] GE "GEH-1783J Phase Sequence and Undervoltage relays Type ICR53A" (pages 3-4, 11-13).

[8] Reidt, Jacob "Application Guide - Implementation of Voltage, Frequency, and Power Elements in the SEL-451 Relay Using SELOGIC Control Equations" (Agosto 2004, pages 2-13).

[9] GE "GEK-65525C Instructions Tree-Phase Power-Directional Relay Type CCP13E" (pages 3-9).

[10] SEL "SEL-451-4 Bay Control, Automation, and Protection System" (Marzo 2010, pages 23-28).

[11] ABB "SPAF 140 C Relé de frecuencia, Manual del usuario y descripción técnica" (2001, pages 7-8, 23, 32).